

## 機械部品軽量化のための材料機能分布の最適化に関する研究

著者	大谷 行雄
号	2040
発行年	1997
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7313">http://hdl.handle.net/10097/7313</a>

氏 名	おお たに ゆき お 大 谷 行 雄
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成10年3月25日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第4条第1項
研 究 科、専 攻 の 名 称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻
学 位 論 文 題 目	機械部品軽量化のための材料機能分布の最適化に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 庄子 哲雄
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 近藤達男 東北大学教授 井上 克己 東北大学教授 内山 勝

## 論 文 内 容 要 旨

機械装置の設計は、その構想から製造までのすべての段階が、ある制約条件のもとでもっとも効果のある解を創造する、最適化の過程である。今後、市場のニーズや社会環境からの要求は益々厳しくなることが予想され、設計現場では、有効な解を効率よく探索する実用的な最適設計手法が必要とされている。

ここでは、機械部品の軽量化、低コスト化を目的にその設計に“材料機能分布の最適化”という考え方を取り入れた。これは、機械部品を多層の材料で構成されるモデルとしてモデル化し各層に全体の機能を実現するための機能（材料）を最適に配分するものである。材料には低コスト化を考慮して汎用材料を使用し、生産量を考慮したコストの詳細な検討が出来るようにする。

問題の特徴として、設計変数である汎用材料の材料特性が離散的であること、目的関数が質量とコストのように複数あり多目的であることが挙げられる。離散的な設計変数を扱うために、これまでにいくつかの方法が提案されているが、最近遺伝的アルゴリズムが提案され、設計変数の組み合わせ数の多い問題を効率適に解く手法として注目されている。また多目的な最適化問題を扱うために、スカラー化手法の一つである重み係数法が一般的に使われている。

本研究は、機械部品の軽量化、低コスト化を目的に、材料機能分布の最適化を実現する、遺伝的アルゴリズムと多目的最適化法を組み合わせた新しい最適設計手法の確立を目指すものである。まず、設計解の収束性と大域的な最適性を実現するための遺伝パラメータを決定し、次にこれを実際の機械部品の設計に適用しその有効性を確認する。

各章において記述した内容と得られた知見は以下の通りである。

第1章では、まず、機械装置が社会のニーズの変化に合わせ最適設計されることの必要性について述べ、現在提案されている最適化手法について概説した。その中で最近注目されている組み合わせ問題に適した遺伝的アルゴリズムの特長を示した。次に今後、機械装置に求められる制約条件を自動車と産業用ロボットを例に考察し、従来にも増して軽量化と低コスト化が重要な条件になることを示した。また、メカトロニクス機器の最適化手法について述べ、材料の最適化の中で材料機能分布の最適化という観点にたち汎用材料の組み合わせで軽量化、低コスト化を図る新しい設計手法について説明した。最後に、この手法を遺伝的アルゴリズムを用いて構築し、実際の機器に適用して効果を確認し、実設計プロセスへの適用を目指す本研究の流れについて述べた。

第2章では、軽量化、低コスト化を目的に、材料機能分布の考え方にもとづく多層構造部品の最適設計手法を、遺伝的アルゴリズムと多目的最適化法を用いて開発した。4層構造のねじりの作用する計算モデルを用いた計算で以下の知見が得られた。

- (1)モデル材料データベースを用いた計算で、突然変異率、エリート保存戦略、世代数、個体数が解の収束性に大きな影響を与える。
- (2)初期の突然変異率を 0.1 とし、それを最終世代まで一定とする方法、それを指数的に減らし最終世代まで突然変異率を残す方法と、線形的に減らし最終世代の前に 0 にする方法の 3 つの方法を検討した結果、最後の方法がもっとも解の収束性が良い。
- (3)同世代中の最大適応度の 1 個体のみを無条件に残すエリート戦略で、収束性良く大域的最適解を得ることができる。
- (4)個体数を 100、世代数 200 で収束性良くほぼ最適な解が得られる。
- (5)質量とコストを目的関数とした多目的最適化問題に対し、重み係数法を採用し、重み係数の割合を変えることにより、ほぼパレート最適解が得られる。
- (6)鉄鋼系、アルミ合金系、樹脂系、セラミックス材料で構成され、機械的な特性とコストに関する項目を網羅した実材料データベースを用いた最適化計算で、生産量に応じ異なる材料構成のパレート最適解が得られる。

第 3 章では、前章で得られた材料機能分布の最適設計手法を、エアコンプレッソ用部品の設計に適用し、軽量化、低コスト化を図った。対象部品には、熱的、力学的条件の厳しいピストンピンを選んだ。4 層構造（一部 3 層）の円筒モデルを用いた最適化計算でピストンピンを設計し、試作・評価した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) FEM 計算の結果は、新しい 2 層構造を採用すると、現行ピストンピンに使われている樹脂材料より 10 倍以上大きな熱伝導率を持つ材料を用いても熱抵抗を 2 倍以上にできることを示した。
- (2) 新しい 2 層構造について、表層材料の肉厚と第 2 層材料の熱伝導率が全体の熱抵抗に及ぼす影響を定式化し、最適化計算に組み込んだ。
- (3) 最適化計算で、外径に制限を加えない場合は、外径を大きくし薄肉化した構造が選ばれ、現行品と同じ径に制限した場合に比べ質量を約 1/2 にできる。
- (4) 生産量 100 の場合と 10000 の場合を比較すると、生産量 10000 では比較的 low コストで樹脂材を用いる解が得られるが、実機に相当する生産量 100 では樹脂材のコストは高く、SCM 浸炭材とセメント系セラミックスを組み合わせる 2 種類の材料の複合材が妥当な解として得られた。
- (5) 材料の面圧強さの制約を除くと、生産量 100 では、セメント系セラミックス 1 種類の材料で構成する単一材が上記複合材のコストを 1/2 にできる。
- (6) セメント系セラミックス 1 種類の材料で構成する単一材は静的な曲げ強度は 49MPa あるが、実機試験で面圧強度の不足が明らかになり、実用化できない。
- (7) セメント系セラミックスと SCM 浸炭材を組み合わせた複合材ピストンピンを試作した結果、42% 軽量化できた。
- (8) セメント系セラミックスと SCM 浸炭材を組み合わせた複合材は実働荷重に対し十分な曲げ疲労強度と面圧強度を有する。

第 4 章では、材料機能分布の最適設計手法を、塗装ロボット用部品に適用し、軽量化、低コスト化を図った。対象部品にはアームの先端に組付けられその質量がアーム駆動用アクチュエータの容量に及ぼす影響の大きいリスト駆動用平歯車を選んだ。最外層に歯車をもつ 4 層構造モデルを用いて最適計算し、その結果にもとづき歯車を試作し評価した。

得られた知見は以下の通りである。

- (1) 2 層歯車に関する FEM 計算の結果は、内層材料のヤング率が小さいと歯の負荷側と反対側のリム内側に引張り応力が発生することを示唆した。
- (2) FEM 計算結果をもとに、歯元応力におよぼすリム厚さと充填材料のヤング率が及ぼす影響を定式化して、最適化計算に組み込んだ。
- (3) 最適化計算の結果、寸法（ピッチ径、歯幅）に制約を加えない場合は、生産量 100 の場合も 10000

の場合も歯を SCM420H 窒化材とし、内部に 2 種類の樹脂を組み合わせ、ピッチ径を大きくして歯幅をせまくする解が全計算の中で最も軽量化できた。

- (4) 実機に合わせ寸法の制約を加えると、生産量 100 の場合、歯を SCM420H 窒化材とし、内側に汎用樹脂を充填する解が得られたが、コストが高く当初想定した射出成形法ではなく、プレス成形法に変更せざるを得ないことがわかった。
- (5) SCM420H 窒化材製の薄肉歯車の内側にポリカーボネート（GF または CF30%入り）をプレス成形で充填する方法で試験用歯車を試作し、現行品に対し 50%の軽量化を実現した。
- (6) 試作した歯車の曲げ疲労試験を実施し、実働応力（200MPa）の 2 倍の応力 400MPa で  $10^7$  回の負荷繰り返しに耐え得る。
- (7) 曲げ疲労試験で破損した歯車はすべてリム部から破損しており、歯車と樹脂部の接合が十分でないことが示唆された。
- (8) 試作した歯車を塗装ロボットに組み込み初期性能に問題のないことを確認した。

第 5 章では、本研究で提案した手法を実際の設計プロセスへ適用するため方法について検討した。計算モデルの作成、制約条件定式化の効率を向上するためのデータベース、知識ベースの活用と他部門を含めた総合インテリジェントシステムの構築について述べた。また、計算の高精度化を図ることを目的としたデータベースと計算モジュールの設計部門と製造部門による共有化を開発プロセス全体のコンカレント・エンジニアリングの考え方の中に位置づけた。

第 6 章は、結論である。

### 審査結果の要旨

機械装置及び部品の設計は、その構想から製造までのすべての段階が、ある制約条件のもとでもっとも効果のある解を創造する最適化の過程である。設計現場では有効な解を効率よく探索する実用的な最適設計手法が必要とされている。

本論文は、機械部品の軽量化、低コスト化を図るため、材料機能分布の最適化という考え方を導入し、それに遺伝的アルゴリズムの手法と多目的最適化法を用いた最適設計手法を提案し、機械部品に適用・試作し、その妥当性を検証したものであり、全編6章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、遺伝的アルゴリズムと多目的最適化の重み係数法を用いて材料機能が分布する多層構造部品の最適設計手法を開発し、4層構造のねじりの作用するモデルとモデル材料データベースを用いた試算により、突然変異率、エリート保存戦略、世代数、個体数が解の収束性に及ぼす影響を明らかにした。さらに同手法により実材料データベースを用いた最適化計算により、生産量に応じて異なる材料構成のパレート最適解が得られることを示した。実用上有用な成果である。

第3章では、開発した材料機能分布の最適設計手法を、エアコンプレッサー用部品のなかでも特に熱的、力学的条件の厳しいピストンピンに適用し、軽量化、低コスト化を図り、SCM浸炭材とセメント系セラミックスの組み合わせを最適解として得ている。それに基づき試作・評価した結果、42%の軽量化を実現でき実働荷重に対しても十分な強度を有することを検証した。これは機械部品設計上有用な成果である。

第4章では、さらに本最適設計手法を、塗装ロボット用部品のなかでもアームの先端に組付けられその質量がアーム駆動用アクチュエータの容量に及ぼす影響の大きいリスト駆動用平歯車に適用した。最外層に歯車をもつ4層構造モデルを用いて最適化し、要求される機能を十分に満足しつつ、50%の軽量化を実現している。

第5章では、開発した手法を実際の設計プロセスへ適用するための具体的方法について検討し、コンカレント・エンジニアリングのなかの位置づけを提案している。これは、本最適設計手法を実用化する上で有用な提案である。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、機械部品の軽量化、低コスト化の両立を図るため材料機能を多層構造に最適に分布させる手法を開発し、その妥当性を検証したものであり機械材料及び設計工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。